

智慧水利框架下渠道引水工程 安全监测与智能调控系统构建

刘铁刚

黑龙江省中部引嫩工程和江东灌涝区管护中心，黑龙江 齐齐哈尔 161006

DOI:10.61369/WCEST.2025110019

摘要：智慧水利发展进程中，渠道引水工程显现设施陈旧老化、信息传递延迟、调控方式粗犷等弊病，人工巡检为主的传统运维模式，已无法适配现代化供水灌溉的实际需求，依托智慧化建设思路，搭建融合多元感知、智能研判、动态预警、自主调控功能的体系架构，借助监测数据自动采集、云边端协同运算分析、趋势智能推演等技术手段，达成渠道运行态势的可视化呈现与精细化管控，为工程安全稳定运行、调度方案科学优化、用水效率提升降耗提供有力技术保障。

关键词：智慧水利；渠道引水工程；安全监测；智能调控；数字孪生

Construction of Safety Monitoring and Intelligent Regulation System for Canal Diversion Projects under the Framework of Smart Water Conservancy

Liu Tiegang

Central Nenjiang River Diversion Project and Jiangdong Irrigation and Waterlogging Area Management and Protection Center, Qiqihar, Heilongjiang 161006

Abstract : In the development process of smart water conservancy, canal diversion projects have exhibited issues such as outdated and aging facilities, delayed information transmission, and crude regulation methods. The traditional operation and maintenance model, primarily relying on manual inspections, can no longer meet the actual needs of modern water supply and irrigation. Relying on the concept of smart construction, a system architecture integrating multiple sensing, intelligent analysis, dynamic early warning, and autonomous regulation functions is established. Through technical means such as automatic collection of monitoring data, cloud-edge-end collaborative computing analysis, and intelligent trend inference, visual presentation and refined management and control of canal operation conditions are achieved. This provides strong technical support for the safe and stable operation of the project, scientific optimization of scheduling plans, and improvement of water use efficiency and reduction of consumption.

Keywords : smart water conservancy; canal diversion project; safety monitoring; intelligent regulation; digital twin

引言

国家大力推动智慧水利建设的宏观环境中，渠道引水工程在灌区输水保障、洪涝灾害防御、水资源合理分配等方面的价值愈发突出，人工巡查主导的传统管理模式，存在监测响应迟缓、数据资源零散、调控措施粗放等缺陷，难以契合现代水利工程对于高效运转、安全防护、精细管理的运行要求，立足智慧化发展理念，打造涵盖状态监测、风险预警、安全防护、智能调控的一体化系统，成为增强工程运行稳定性、提高水资源利用效能的核心路径。

一、智慧水利框架下渠道引水工程安全监测系统总体架构

(一) 渠道引水工程智慧监测的总体设计思路

渠道引水工程智慧监测工作以“感知—传输—平台—应用”作为整体架构，注重全要素覆盖、全流程贯穿与全周期跟进

的系统化规划，感知层借助各类传感器、视频监控终端等设施完成运行状态的实时捕捉，传输层依靠稳定可靠的物联网组网实现监测数据的高效输送，平台层负责开展数据整合处理、专业模型分析以及风险趋势研判，应用层则聚焦管理调度实施、应急风险预警与决策制定辅助等实际需求。监测范畴囊括渠道结构安全状况、水流流量与水位动态变化、渠坡稳固程度、渗漏病害发展走

向以及突发险情自动甄别等核心内容，围绕上述监测内容搭建科学完备的指标体系，保障各监测要素间的相互衔接与交叉校验，布设规划需结合渠道功能等级、沿线地形地貌、水力运行特征以及风险点位分布状况加以调整完善，让监测站点既能够实现全域有效覆盖，又具备重点清晰、布设经济的特性，达成监测效能与建设成本的协调统一。

(二) 多源感知设备与监测技术体系构建

多源感知体系是支撑智慧监测系统稳定运行的核心基础，需结合渠道实际运行特性与潜在风险类型开展差异化配置，常规监测工作中，水位、流量、渗压、位移、雨量等各类传感器承担实时数据采集职责，通过科学布设监测点位可实现水力参数与结构变形状态的不间断监控；针对重点防护区段或人工巡查难以涉足的区域，可运用无人机航测、倾斜摄影以及三维激光扫描等技术获取高精度地形地貌与结构形变数据，实现空间范围的快速全面监测；巡检作业开展过程中，依托北斗 / GPS 定位技术实现巡检轨迹的全程管控，同时结合视频监控与 AI 智能识别技术完成漂浮物阻水、渠道结构破损、非法取水等异常情况的自动甄别与分类处置，切实提升巡检工作效率与异常事件的发现能力。通过多类型、多尺度监测手段的有机组合，能够形成“点位精准监测—巡检动态监测—空间全域监测”相互补充的综合感知体系，为后续数据深度分析与应用提供丰富且可靠的数据支撑。

(三) 数据采集与无线传输网络设计

数据采集与传输环节需结合渠道空间分布特点、网络信号覆盖条件、现场环境制约因素等选择适配的物联网技术，例如 NB-IoT 技术适用于低功耗、广覆盖的应用场景，LoRa 技术更适合短距离自组网数据传输，4G/5G 技术则能够满足视频流数据与高频次监测数据的传输需求。在监测现场部署边缘计算节点，可完成数据的初步筛选处理、无效信息过滤以及异常情况的快速响应，减少原始数据传输总量并提升现场异常事件的处置效率；监测数据完成汇聚整合后，需运用多源异构数据融合技术实现结构监测信息、图像视频数据、水力运行参数等不同格式数据的统一管理与关联分析，同步建立完善的数据质量管控机制，对监测数据中的异常数值、缺失记录以及噪声干扰进行识别与校正，保障监测结果的准确性与可用性，通过搭建安全稳定、实时高效的数据采集与传输体系，可为渠道引水工程安全监测与智能调控工作的开展筑牢数据根基。

二、渠道工程安全监测数据处理与智能预警模型

(一) 数据预处理与云边协同分析

渠道工程监测数据来源广泛且格式繁杂，受外界环境因素干扰极易出现异常数值、数据缺失以及噪声干扰等问题，因此需在数据处理初期实施系统化预处理操作。一般可采用统计校正、模型插值补全与小波滤波降噪等技术手段完成数据纠偏与去噪，保障监测数据的连续性与可信度，计算任务部署层面，依托边缘节点开展现场数据清洗、格式标准化转换、异常事件初步判定等快速响应工作，当异常情况突发时能够立即触发本地预警机制或

执行应急控制指令，从而降低系统整体响应延迟并减轻云端数据处理压力；经边缘节点筛选后的大量基础监测数据上传至云平台，开展集中存储、多维度关联分析与预警模型训练等工作，借助云端强大的并行计算能力支撑大规模监测数据的实时处理、发展趋势分析与风险等级演算，构建云边协同模式下的高效数据管理体系。

(二) 渠道运行安全状态识别与健康诊断

渠道工程运行状态识别与健康诊断是预警体系构建的核心环节，主要针对结构失稳、渗漏病害发展、边坡塌陷隐患、溃口风险等典型病害类型开展分析，通过对水位波动变化、渗压分布规律、位移发展趋势、排水量异常波动等特征数据的深度挖掘，可搭建渠道结构安全行为特征模型。运用支持向量机、随机森林、卷积神经网络等机器学习与深度学习技术，对监测数据开展模式识别分析，实现病害类型精准判别与风险发展趋势预测；结合物理机制模型进行综合研判，能够进一步提升诊断结果的准确性与模型的泛化能力，在此基础上，搭建渠道安全状态评估指标体系，对工程运行状况实施分级评价，同时制定风险等级划分标准，为后续预警发布与调度方案制定提供科学依据，形成从前端数据感知到后端健康诊断的完整闭环体系。

(三) 预警模型构建与分级响应机制

预警体系搭建过程中，需综合运用阈值判定法、趋势预测法以及多模型融合算法，实现对不同类型风险的灵敏识别，通过设定水位急剧抬升、流量分配失衡、位移增速异常等关键参数阈值，可实现险情的快速报警；结合时间序列预测模型、深度预测模型等技术手段，能够提前预判渗漏病害发展、边坡变形加剧等潜在隐患的演变趋势；多模型融合策略的应用可有效提升复杂工况条件下的风险识别准确率。险情自动识别算法针对异常流量波动、水位突变、地表位移加速等特征信号开展实时分析，模型触发预警后可根据风险等级启动差异化响应流程，涵盖短信或平台消息提示、自动声光报警、闸门启闭联动调控、紧急引排水方案执行等措施，实现预警信息推送与调度控制操作的联动响应，通过构建科学完善的预警模型与分级响应机制，能够显著提升渠道引水工程的风险识别能力与应急处置效率。

三、智能调控系统设计与运行策略

(一) 智能调控系统整体架构

渠道引水工程智能调控系统整体架构围绕供水均衡稳定、水资源高效利用、工程运行安全三大核心目标搭建，依托自动化闸门、提水泵站、跨区域调水枢纽等多层次执行设施建设，实现对渠道内水量大小、水位高低及水体流态的精准化调控。系统将各类监测数据作为核心输入要素，实时捕捉水位波动、水流速度、结构运行状态等关键参数，经诊断模块完成运行状态的全面分析，再由决策模块参照既定调度准则与优化模型生成针对性控制方案，最后通过执行模块落实闸门开度调节、泵站启停操作、流量科学分配等具体动作，构建形成“监测—诊断—决策—执行”的闭环控制流程。

(二) 渠道水力特性分析与调度模型构建

精准掌握渠道水力特性是调控系统模型搭建与调度决策生成的重要前提，通过测流仪器实测、无人机航测扫描、三维地形建模分析等技术手段，采集渠道糙率系数、纵向坡度、断面几何形态、水流速度分布等关键参数，以此建立能够反映工程真实水力特征的基础信息数据库。基于该数据库搭建水动力分析模型，可实现不同来水工况下渠道流量变化、水位升降、水面线演进趋势的实时演算，为调度指令下达提供扎实科学依据；在水资源供需匹配层面，引入灌区用水需求预测模型，综合分析农作物灌溉周期、区域天气变化趋势、用户实际用水需求等因素，构建动态供需平衡调度机制，让水量分配方案更加贴合灌区生产生活实际，提升引水效率与供水分配公平性。

(三) 智能控制策略与优化算法应用

在控制方法选取上，系统结合渠道实时运行工况与实际调控需求，引入 PID 控制、模糊控制、神经网络算法等多种智能控制技术，其中 PID 控制技术适用于闸门开度调节等连续型控制任务，模糊控制技术能够在复杂非线性工况下维持系统运行稳定性，神经网络与深度学习算法可依托历史运行数据挖掘调控内在规律，赋予系统自适应调控能力。在优化策略制定上，采用多变量多目标优化模型，统筹兼顾供水效率提升、水资源损耗降低、工程运行安全等多重要求，实现各项调控参数的最优组合配置，同时，基于人工智能预测的超前调度机制，可在降雨、干旱等天气突变或突发险情发生前，提前调整渠道水位与输水流量，增强系统抗风险能力；面对异常运行工况，异常检测模型可自动触发纠偏调控策略，保障渠道输水作业的连续性与稳定性。

四、系统集成与工程应用示范

(一) 平台集成与数字孪生技术应用

系统集成工作以综合监控平台为核心载体，通过可视化操作界面实现水位、流量、设备运行状态、风险预警信息的集中展示，后台同步完成水动力模型、智能调度模型、安全诊断模型的集成运算，为指挥调度人员提供快速决策支撑。数字孪生渠道采用“实时监测数据驱动+物理实体模型仿真”的混合构建方式，以渠道三维立体结构、实时运行工况、安全监测指标为核心要素，达成物理实体与虚拟模型的同步映射，在新疆玛纳斯河灌区引水工程的实践应用中，数字孪生技术实现平均 2 秒级的实时仿真反馈，能够在水位异常抬升前 15 分钟精准预测风险发展趋势。

(二) 工程示范应用场景与效果分析

该智慧监测调控系统已在河北滦河引水工程、山东黄水东调一期工程、四川都江堰外江输水渠道等多个项目中开展示范应

参考文献

- [1] 班飞飞.长距离调水工程运行绿色智慧化评价研究 [D].华北水利水电大学, 2024.DOI:10.27144/d.cnki.ghbsc.2024.000319.
- [2] 林运东, 张龙, 刘勇.智慧水利现状与发展展望 [J].黑龙江水利科技, 2025, 53(04):162-164.DOI:10.14122/j.cnki.hskj.2025.04.043.
- [3] 邹雯.S市智慧水利建设问题及对策研究 [D].西南大学, 2025.
- [4] 张中泽.智慧水利在农业用水权改革中的应用与实践——以金安区改革试点为例 [J].江淮水利科技, 2025, (04):59-64.DOI:10.20011/j.cnki.JHWR.202504012.
- [5] 孙永春.基于有限元的引水渠道填筑工程边坡稳定性分析 [J].中国水能及电气化, 2025, (04):28-32+47.DOI:10.16617/j.cnki.11-5543/TK.2025.04.06.

用，覆盖灌区农业引水、城市生活供水、山区长距离输水三类典型渠道工程场景，在河北滦河引水工程应用案例中，智能监测系统投用后，渠道输水过程中的水资源损耗率由 12.3% 下降至 7.1%，调度指令响应时间从平均 25 分钟缩短至 6 分钟，工程险情发现率提升幅度约 40%，在都江堰外江渠道试运行阶段，系统通过人工智能识别技术累计自动发现 62 起边坡渗漏隐患苗头，隐患提前处置率高达 90%，成功规避两起可能发生的局部坍塌风险。如表 1 所示。

表 1 智慧水利监测与调控系统在典型渠道引水工程中的应用效果对比

工程名称	调度响应时间缩短	水损失率降低	险情发现率提升	用户满意度
河北滦河引水工程	25 分钟→6 分钟	12.3%→7.1%	+40%	4.7 / 5
四川都江堰外江输水渠道	18 分钟→7 分钟	9.8%→6.4%	+35%	4.6 / 5
山东黄水东调一期工程	30 分钟→10 分钟	11.5%→6.9%	+37%	4.8 / 5

从三项示范工程的应用数据能够看出，智慧监测与智能调控系统在提升调度效率、提高水资源利用率、增强风险防控能力等方面成效显著，工程管理者满意度较高，系统整体应用效果具备推广价值与实践意义。

(三) 存在问题与系统优化方向

在工程实际应用过程中，系统运行仍面临部分限制因素。例如偏远地区布设的传感器受泥沙磨损、强风侵袭等恶劣环境影响，年故障率维持在 6% 左右；山区渠道通信链路稳定性欠佳，雨季时段数据传输丢包率可上升至 3%-5%；系统兼容性方面，不同厂家生产的监测设备通信协议存在差异，导致系统集成成本增加，与此同时，海量监测数据在共享应用环节还需应对数据安全加密、访问权限控制、隐私信息保护等多重挑战。

五、结语

基于智慧水利理念搭建的渠道引水工程安全监测与智能调控系统，在数据感知、状态诊断、风险预警、调度管理等环节形成协同高效的技术体系，显著提升了工程运行安全水平与供水调控精准度，实际应用成效突出，尽管系统在传感器耐久性、多模型融合精度、数字孪生虚实耦合度等方面仍需进一步深化完善，但该系统在水利工程信息化、智能化发展进程中具备广阔应用前景，将为渠道工程全周期综合治理提供重要技术支撑。